

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508121

高速数据传输线测量与表征方法*

刘明金¹ 年夫顺^{1,2} 袁国平² 张 婷¹ 张榕方¹

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030000; 2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266000)

摘 要:随着高速数据传输线的传输速率不断提升,高速数字传输线的阻抗匹配和带宽问题不容忽视,如何利用微波电路工程师熟悉的 S 参数,来表征数字电路工程师熟悉的时域眼图,是测量工程师必须解决的问题。设计了一种高速数据传输线的测量表征方法,利用多端口矢量网络分析仪测量表征高速数据传输线的反射、传输和串扰特性,在微波电路工程师熟悉的 S 参数和数字电路工程师熟悉的眼图之间建立直接对应关系。利用多端口矢量网络分析仪测量多通道数据传输线的频域 S 参数,进行傅里叶反变换,获得多通道数据传输线的时域反射、传输和串扰的冲激响应,并与理想的输入数字信号卷积,从而获得数字传输线对理想的输入数字信号的反射、传输和串扰信号,通过数字传输线的反射、传输和串扰数字信号眼图,就可以直观地表征数字传输线性能特性。以 HDMI 数据传输线频域与时域性能特性测量表征为应用场景,制作了 HDMI 数据传输线的测试夹具,对 HDMI 数据传输线的时域反射、传输和串扰眼图进行测量,并给出了实验结果。从实测的时域眼图可以看出,随着传输速率提高,HDMI 数据传输线的传输质量变差,输出速率为 5 Gb/s 时域眼图比较清晰,数字传输线能够较好完成传输任务,数字传输速率为 10 Gb/s 时,时域眼图已经模糊不清,无法完成数字信号传输,验证了数据传输线测量表征方法的有效性和准确性。传统的数字存储示波器和取样示波器眼图测量,需分别测量输入和输出眼图,人工进行比对,判断传输线的信号传输质量。该测量表征方法,直接测量数字传输线的反射、传输和串扰眼图,直接反映传输线的信号传输质量,解决了高速数字传输线测量表征难题,对高速数字通信、算力网络、移动通信等领域的数字传输测量表征有重要意义。

关键词: 高速数据传输线;多通道测量;S 参数;眼图

中图分类号: TN98;TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Measurement and characterization methods for high-speed data transmission lines

Liu Mingjin¹ Nian Fushun^{1,2} Yuan Guoping² Zhang Ting¹ Zhang Rongfang¹

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030000, China;
2. Ceyear Technologies Co. Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: With the continuous increase in the transmission rate of high-speed data transmission lines, how to use the S parameters familiar to microwave circuit engineers to characterize the time-domain eye diagrams familiar to digital circuit engineers has become a problem that measurement engineers must solve in the context of impedance matching and bandwidth issues for high-speed digital transmission lines. This paper designs a measurement and characterization method for high-speed data transmission lines, which uses a multi-port vector network analyzer to measure and characterize the transmission characteristics of high-speed data transmission lines, establishing a direct correspondence between the S parameters familiar to microwave circuit engineers and the eye diagrams familiar to digital circuit engineers. By using a multi-port vector network analyzer to measure the frequency-domain S parameters of multi-channel data transmission lines, including the reflection S parameters, transmission S parameters, and crosstalk S parameters of the data transmission lines, the frequency-domain modeling of multi-channel data transmission lines is achieved. Through the inverse Fourier transform of the frequency-domain reflection S parameters, transmission S parameters, and crosstalk S parameters of multi-channel data transmission lines, the time-domain reflection, transmission, and crosstalk impulse responses of multi-channel data transmission lines are

收稿日期: 2025-01-12 Received Date: 2025-01-12

* 基金项目: 国家自然科学基金(U24B6013)项目资助

obtained. Assuming that an ideal error-free digital signal is input to a non-ideal multi-channel data transmission line, the output digital signal of the multi-channel data transmission line can be obtained through the convolution of the input digital signal and the impulse response, thereby obtaining the eye diagram familiar to digital circuit engineers and achieving the time-domain modeling of multi-channel data transmission lines. Taking the frequency domain and time domain performance characteristic measurement and characterization of HDMI data transmission lines as the application scenario, a test fixture for HDMI data transmission lines was fabricated. The time domain reflection, transmission and crosstalk eye diagrams of HDMI data transmission lines were measured, and the experimental results were presented. From the measured time domain eye diagrams, it can be seen that as the transmission rate increases, the transmission quality of HDMI data transmission lines deteriorates. When the output rate is 5 Gb/s, the time domain eye diagram is relatively clear, and the digital transmission line can complete the transmission task well. When the digital transmission rate is 10 Gb/s, the time domain eye diagram is already blurred and unclear, and cannot complete the digital signal transmission. This verifies the effectiveness and accuracy of the data transmission line measurement and characterization method. The traditional eye diagram measurement of digital storage oscilloscopes and sampling oscilloscopes requires separate measurements of the input and output eye diagrams, followed by manual comparison to determine the signal transmission quality of the transmission line. The measurement and characterization method proposed in this paper directly measures the reflection, transmission, and crosstalk eye diagrams of digital transmission lines, directly reflecting the signal transmission quality of the transmission line. This solves the measurement and characterization difficulties of high-speed digital transmission lines and is of great significance for the measurement and characterization of digital transmission in fields such as high-speed digital communication, computing power networks, and mobile communication.

Keywords: high-speed data transmission lines; multichannel measurement; scatter parameter; eye diagram

0 引言

随着高速数字通信、光纤通信、5G 移动通信等现代通信网络的不断发展,数字传输速率已由 40 Gb/s 向 100 和 400 Gb/s 高速方向发展,通信网络服务器、交换机和大型计算机等核心设备之间互联传输线的数据速率不断提升,互联传输线的工作带宽和阻抗匹配问题已不容忽视,需要一种数学模型来表征互联数据传输线的反射损耗、传输损耗、插入相位、延时和串扰等性能特性,更需要一种测量方法,直接测量数字电路工程师所熟悉的眼图、误码率和抖动等性能参数^[1-4]。传统的高速数据传输线测量与表征方法主要采用数字存储示波器和取样示波器,分别测量数据传输线的输入和输出时域数字信号波形并绘制出时域眼图,通过对输入和输出眼图进行比较,可以判断数字传输线的传输特性^[5]。通过示波器观察数字信号波形和眼图,能够直观地看到数字信号的幅度、边沿、过冲和衰减等参数。同时可以利用数字存储示波器或者取样示波器的时域反射测试功能,测量数字传输线长度,以及对沿着传输线不连续性进行定位,具有故障诊断能力。不论是采用数字存储示波器,还是采用取样示波器,只能测量一根传输线的反射特性或者传输特性,无法同时获得多根传输线的反射和传输眼图,更无法获得不同传输线之间的串扰眼图。由于 A/D 变换器和宽频带取样器的研制难度较大,我国现阶段 40 GHz 以上数字存储示波器和取样示波器还在攻关阶段。因此有必要转换思路,把微波矢量网络分析仪引入数字传输线的测量表征,利用微波电路工程师熟悉的 S 参数来表征数字传

输线的频域和时域特性,在数字电路工程师熟悉的眼图和微波电路工程师熟悉的 S 参数之间建立直接的映射关系^[6]。

本文以多通道高速数据传输线为应用场景,把多通道数据传输线作为多端口微波网络,利用微波矢量网络分析仪测量多端口网络 S 参数,主要包括多通道数据传输线的频域反射、传输 S 参数,频域反射 S 参数反映数据传输线的阻抗匹配情况,频域传输 S 参数反映数据传输线的传输与串扰情况,通过多端口矢量网络分析仪可实现数据传输线的频域建模。通过对频域反射和传输 S 参数进行傅里叶反变换,可以获得时域反射和传输的冲激响应。假设把一个理想无误码的数字信号输入到一个非理想的多通道数据传输线,通过输入数字信号与冲激响应的卷积,就可以获得多通道数据传输线的输出数字信号,把输出数字信号用眼图形式表达出来,数字电路工程师根据眼图质量就可以分析出多通道数据传输线的性能特性。通过多端口矢量网络分析仪测量的数据传输线频域参数,结合时域卷积运算,就可以实现对比多通道数据传输线的时域建模。本文介绍了以矢量网络分析仪为基础的多通道高速数据传输线的频域和时域建模方法,采用时域眼图以及频域 S 参数相结合的形式来对高速数据传输线进行测量与表征,并以 HDMI (high definition multimedia interface) 高速数据线为实验验证对象,最终给出了实验数据和实验结果,试验结果表明本文所采用的测量与表征方法可直接获得由于数字传输线的非理想性造成的时域眼图变化,无需进行输入和输出对比分析,就可以直观地获得反射、传输和串扰眼图。

1 高速数据传输线测量表征

常用数据传输线主要有 HDMI、USB、PCIe 和 SlimSAS 等数据传输线形式,具有多通道、高速率、高带宽等特点。目前 HDMI 和 USB 等数据传输线传输速率已超过 10 Gb/s,PCIe 数据传输线单通道传输速率已超过 16 Gb/s。HDMI2.1 高速通道有 8 根传输线,SlimSAS 有 64 根传输线,PCIe X4 数据传输线有 32 根传输线。针对多通道高速数据传输线频域与时域建模与测量需求,把多通道数据传输线等效成多端口网络,假设数据传输线数量为 N ,可以等效成 $2N$ 个端口的网络如图 1 所示,可用 $2N$ 个端口 S 参数来表征 N 个数据传输线的反射和传输参数模型^[7]。

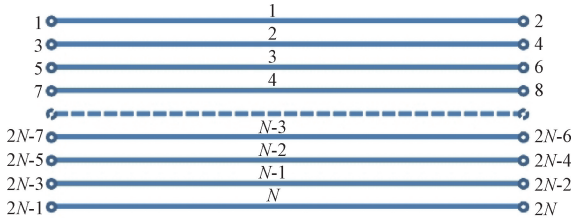


图1 数据传输线等效物理模型

Fig. 1 Equivalent physical model of data transmission line

1.1 多通道数据传输线频域表征方法

微波宽频带矢量网络分析仪可以用来测量微波传输线反射和传输特性,通过幅度和相位信息来表征微波传输线的工作带宽和阻抗匹配等性能特性。假设多通道数据传输线有 N 个传输线, N 个传输线的散射 S 参数模型如图 2 所示。通过微波矢量网络分析仪测量多通道数据传输线 $2N \times 2N$ 个 S 参数,表征数据传输线的频域反射和传输特性、通道之间串扰特性^[8-9]。

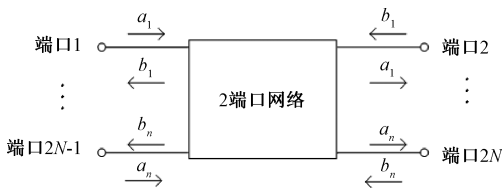


图2 多通道数据传输线的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of multi-channel data transmission line

N 代表传输线数量, $2N$ 个端口网络散射参数计算如式(1)所示,共有 $2N \times 2N$ 个 S 参数组成。

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_{2N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1,2N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{2N,1} & \cdots & S_{2N,2N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_{2N} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $S_{11}, S_{22}, \dots, S_{NN}, \dots, S_{2N,2N}$ 分别代表 $2N$ 端口反射参数, S_{ii} (其中 i 取值为 $2N, N$ 为整数) 表示当端口 $(i+1)$ 接匹配负载时,端口 i 的反射波与入射波的复比值, $S_{ii} = \frac{b_i}{a_i}$ (其中 a_i 为入射波, b_i 为反射波), S_{ii} 也称为回波损耗, S_{ii} 的幅度直接反映端口 i 的反射能量比例。 $S_{21}, S_{43}, \dots, S_{2N, (2N-1)}$ 为数据线正向传输参数, $S_{12}, S_{34}, \dots, S_{(2N-1), 2N}$ 为数据线反向传输参数,如 S_{ij} (其中 i 取值为 $2N, j$ 取值为 $2N-1, N$ 为整数) 表示当端口 i 接匹配负载时,端口 j 的入射波传输至端口 1 的比值, $S_{ij} = \frac{b_j}{a_i}$ (其中 a_i 为端口 i 入射波, b_j 为端口 j 的反射波), S_{ij} 也称为反向传输系数,其物理意义为信号从输出端口反向传输至输入端口的能力,常用于衡量系统的反向隔离性能。其他 S 参数均为数据线之间串扰参数,反映传输线之间的隔离情况^[9-11]。

通过微波宽频带矢量网络分析仪扫频测量,来获得数据传输线的频域 $S_{ij}(j\omega)$ 参数,包括反射 $S_{ij}(j\omega)$ 参数, i 和 j 数字均相等,传输和串扰 $S_{ij}(j\omega)$ 参数, i 和 j 数字均不相等^[12]。

1.2 多通道数据传输线时域表征方法

对于 $2N \times 2N$ 个 S 参数频域 $S_{ij}(j\omega)$ 进行傅里叶反变换,可以获得 $2N \times 2N$ 个时域冲激响应 $h_{ij}(t)$,其中包含多通道数据传输线的反射、传输、串扰的冲激响应。

按照数字信号处理的习惯,用 $H(j\omega)$ 代表 $2N \times 2N$ 个频域 $S_{ij}(j\omega)$ 当中任何一个 S 参数,用 $h(t)$ 代表 $2N \times 2N$ 个时域 $h_{ij}(t)$ 当中任何一个冲激响应,可以简化计算公式。 $h(t)$ 与 $H(j\omega)$ 可以通过傅里叶变换和傅里叶反变换实现相互转换^[13-15]。

当一个理想的没有误码的数字信号通过一个非理想的数据传输线,利用卷积运算就可以获得理想无误码的数字信号通过一个非理想数据传输线的输出数字信号,计算公式如式(2)所示。

$$y(t) = x(t) \times h(t) \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 代表一个理想无误码的数字信号; $h(t)$ 代表非理想数据传输线的冲激响应; $y(t)$ 代表一个理想无误码的数字信号通过一个非理想的数据传输线之后的输出数字信号,用输出数字信号 $y(t)$ 信号按比特位叠加后可以绘制出数字电路工程师熟悉的眼图^[16-21]。

把微波电路工程师熟悉的 S 参数,引入到数字电路工程师熟悉的眼图测量,通过数字眼图,可以获得传输的误码率、抖动、时延等性能参数,解决了高速数字电路设计和高速数据传输线测量表征问题。

2 实验与结果

以 HDMI 数据线为实验对象,完成了多通道数据传输线测量与表征的实验验证。HDMI 传输线共有 8 个传输通道,可通过 16 端口微波矢量网络分析仪测量得到 256 个频域 S 参数,其中 8 个正向反射 S 参数、8 个反向反射 S 参数、8 个正向传输 S 参数、8 个反向传输 S 参数、112 个正向串扰 S 参数、112 个反向串扰 S 参数。实验测量仪器采用电科思仪公司 3648LA 型 16 端口微波矢量网络分析仪。通过 HDMI 数据线的测量夹具,与矢量网络分析仪连接。HDMI 数据传输线与矢量网络分析仪连接如图 3 所示。

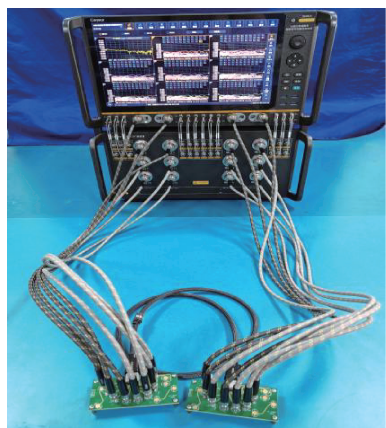


图 3 实验系统实物连接

Fig. 3 Physical connection diagram of experimental system

2.1 频域 S 参数测量数据

首先对测量频率范围 10 MHz~20 GHz 的 16 端口矢量网络分析仪进行电子校准,校准之后微波矢量网络分析仪首先连接测量夹具,再连接被测 HDMI 数据传输线。通过 16 端口矢量网络分析仪可以获得 8 根数据线的反射、传输和串扰共计 256 个 S 参数。对于 HDMI 数据传输线,重点关注 8 个正向反射 S 参数和 8 个反向反射 S 参数,反映数据传输线的阻抗匹配特性,8 个正向传输 S 参数和 8 个反向传输 S 参数,反映 8 个传输线正向和反向传输特性。

HDMI 数据传输线 8 根传输线正向传输 S 参数和反向传输 S 参数如图 4 所示。从图 4 中可以看出,8 根传输线正向和反向传输损耗基本一致,随着工作频率提高插入损耗不断增加。由图 4 可知传输 S 参数(S_{21})表征信号通过传输线时的幅度衰减和相位偏移特性。实验数据显示,HDMI 数据线正向传输损耗在 10 GHz 时达到 -28 dB,即信号功率衰减至输入值的 1/700。这

一结果反映了高频段介质损耗和导体趋肤效应的综合影响。

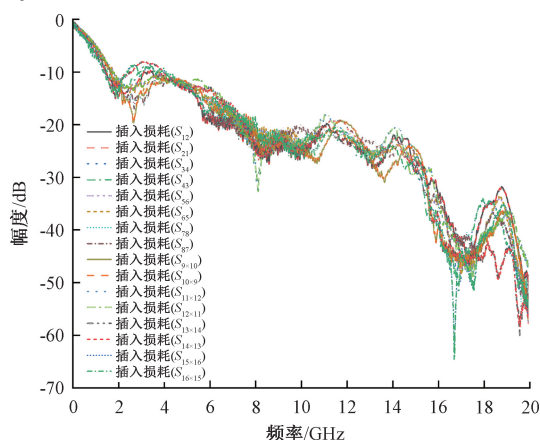


图 4 HDMI 数据线传输 S 参数

Fig. 4 HDMI data cable transmission of S parameters

HDMI 数据传输线 8 根传输线正向和反向反射 S 参数如图 5 所示。由图 5 可知随着频率升高, S_{11} 幅值逐渐增大,表明高频段阻抗失配问题加剧。这一现象主要源于传输线趋肤效应和介电损耗的增加,导致信号反射系数上升。值得注意的是,反向反射参数 S_{22} 表现出与 S_{11} 相似的趋势,验证了多端口网络模型对称性假设。

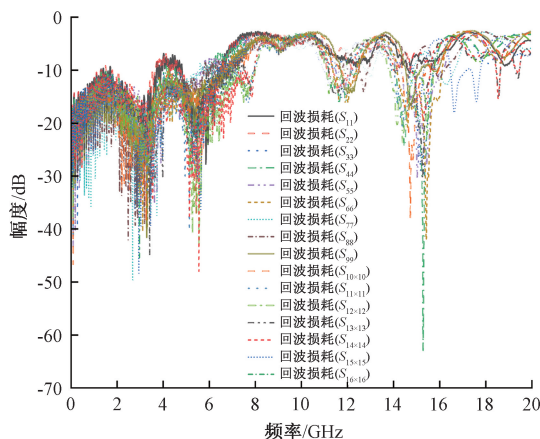


图 5 HDMI 数据线反射 S 参数

Fig. 5 HDMI data cable reflection of S parameters

对于 HDMI 数据传输线的串扰 S 参数,选择 1 个端口作为输入端口,可以测量 1 个端口到其他 15 个端口的串扰 S 参数。一般情况下,16 个端口分别作为输入端口,到其他端口的串扰应基本相似。因此本文把 1 端口作为输入端口,可测量第 1 根传输线反射 S 参数(S_{11})和 7 个近端端口的串扰 S 参数,如图 6 所示。其中 S_{11} 为端口 1 回波损耗,其他 7 个 S 参数均为串扰。从图 6 可以看出相邻传输线近端隔离较小,串扰比较大,但均不够明显。

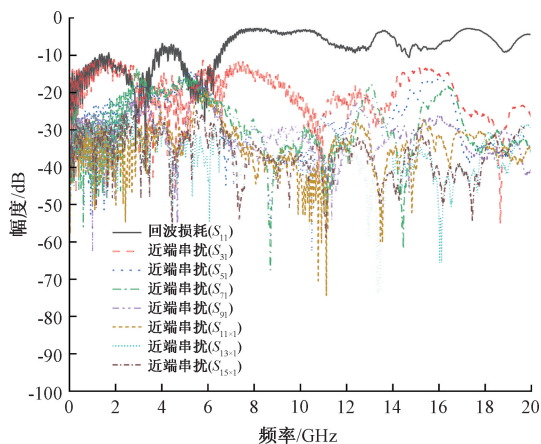


图6 HDMI数据线近端串扰S参数

Fig. 6 HDMI data cable near end crosstalk S parameter

当1端口作为输入端口,可测量第1根传输线远端传输S参数(S_{21})和7个远端端口的串扰S参数如图7所示。其中 S_{21} 为第1根传输线端口1到端口2传输特性,其他7个S参数均为远端串扰。从图7可以看出,除了低频之外,第1根传输线对第2根相邻传输线远端串扰比较大, S_{41} 和 S_{21} 高频段曲线变化趋势基本一致,第1根传输线对其他物理距离较远的传输线串扰基本一致,均小于第1根传输线到第2根传输线的远端串扰。

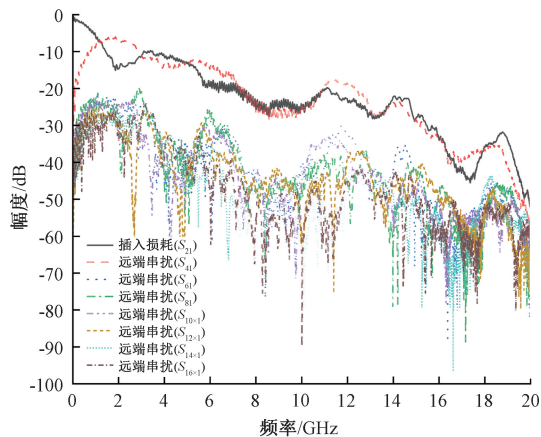


图7 HDMI数据线远端串扰S参数

Fig. 7 HDMI data cable far end crosstalk S parameter

综上所述,从图6可以看出,相邻通道间的近端串扰幅值较大,但随着频率升高,串扰能量逐渐向高频扩散,导致高频段串扰抑制能力增强。远端串扰(图7)在低频段受趋肤效应影响较小,但在10 GHz附近出现显著衰减。值得注意的是,物理距离较远的传输线(如通道1与通道3)串扰水平低于邻近通道(通道1与通道2),验证了传输线布局设计中“物理隔离降低串扰”的有效性。

2.2 时域眼图测量数据

利用傅里叶反变换,通过256个频域S参数,可以计算出256个时域冲激响应。利用式(2)可以计算出一个理想无误码的数字信号输入到HDMI数据传输线的16个端口,可以得到256个输出数字信号,利用256个输出数字信号,可以得出256个眼图,包括8个正向反射眼图和8个反向反射眼图、8个正向传输眼图和8个反向传输眼图、112个正向传输串扰眼图和112个反向传输串扰眼图。

对于HDMI数据传输线,重点关注8个正向反射眼图和8个反向反射眼图、8个正向传输眼图和8个反向传输眼图。对于一个非理想的多通道数据传输线,需要考察不同传输速率下的传输眼图。当传输速率为1 Gb/s理想无误码的数字信号输入到数据传输线时,8个传输线正向传输眼图如图8所示,此时眼高为710 mV,眼宽为150 ps,噪声基底清晰。当传输速率为5 Gb/s理想无误码的数字信号输入到数据传输线时,8个传输线正向传输眼图如图9所示,此时眼高降至300 mV,眼宽缩窄至80 ps,噪声基底开始模糊。且此时码间干扰和串扰效应显著增强。当传输速率为10 Gb/s理想无误码的数字信号输入到数据传输线时,8个传输线正向传输眼图如图10所示,此时眼图完全闭合,眼高不足50 mV,无法满足可靠通信要求。

综上所述,从图8~10可知,随着传输速率不断提高,HDMI数据传输线的数字信号传输质量变的越来越差,到了10 Gb/s时已无法完成数字信号的传输。

数据传输线之间串扰眼图如图11和12所示,分别表征了通道1与其他通道之间的近端和远端串扰。相较于频域曲线可以更为直观地看出传输线之间物理距离较远传输线其串扰小于物理距离较近传输线串扰,与实际情况相符合。

由图11可以看出, S_{31} 与 S_{11} 比较接近,说明第1根传输线到第2根传输线的近端串扰较大,随着传输线物理距离不断增加,数据传输线近端串扰越来越小,眼图可以直观地表征串扰特征。邻通道的串扰信号与主信号在时域叠加,导致眼图噪声基底抬升。第1根传输线到第2根传输线的串扰使眼高降低30%,误码率增大。

从图12同样可以看出, S_{41} 与 S_{21} 比较接近,说明第1根传输线到第2根传输线的远端串扰较大,随着传输线物理距离不断增加,数据传输线远端串扰越来越小,眼图可以直观地表征远端串扰特性。尽管能量较弱,但在多通道系统中累积效应显著。第1根传输线到第2根传输线的远端串扰使眼宽缩窄20%,加剧了定时误差风险。

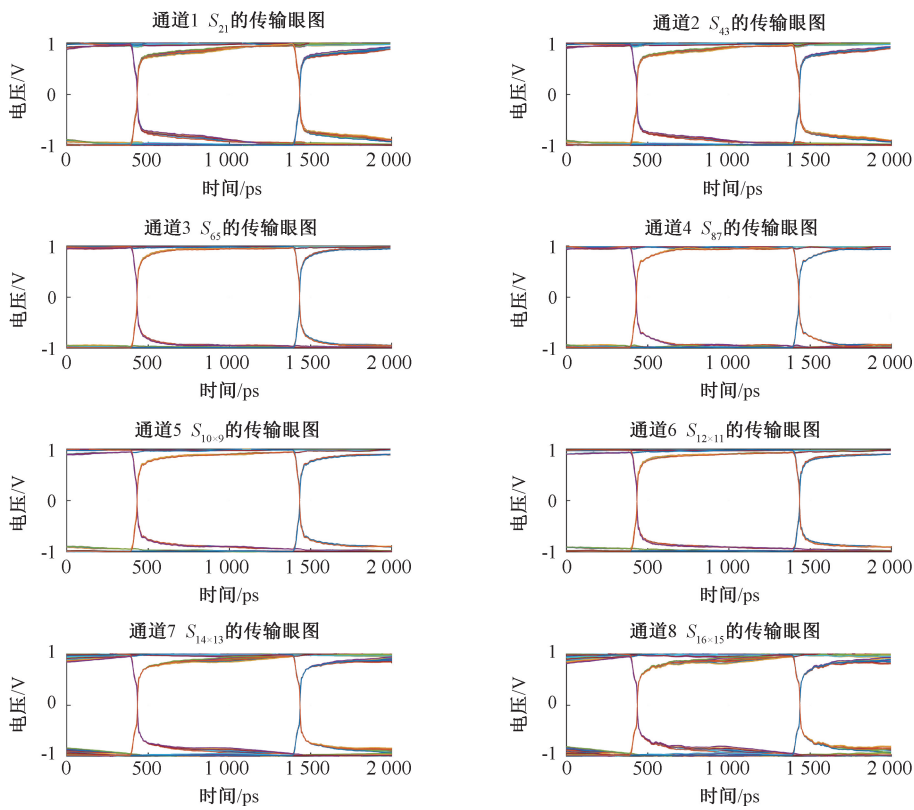


图 8 传输速率 1 Gb/s 时 HDMI 传输线正向传输眼图

Fig. 8 Forward transmission eye diagram of HDMI transmission line at a transmission rate of 1 Gb/s

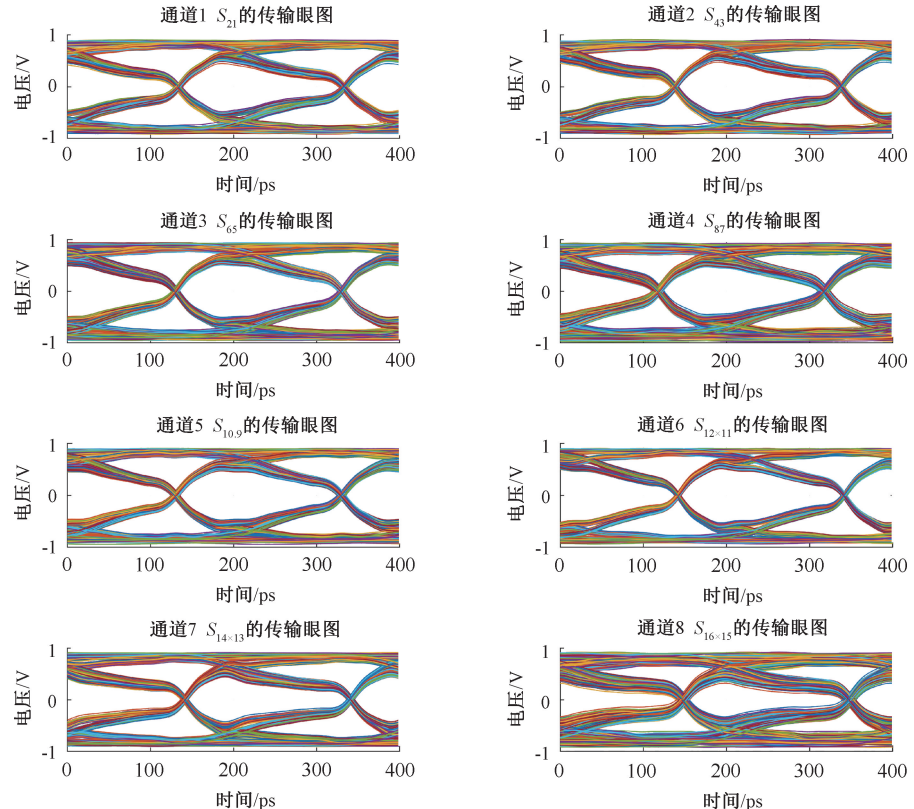


图 9 传输速率 5 Gb/s 时 HDMI 传输线正向传输眼图

Fig. 9 Forward transmission eye diagram of HDMI transmission line at a transmission rate of 5 Gb/s

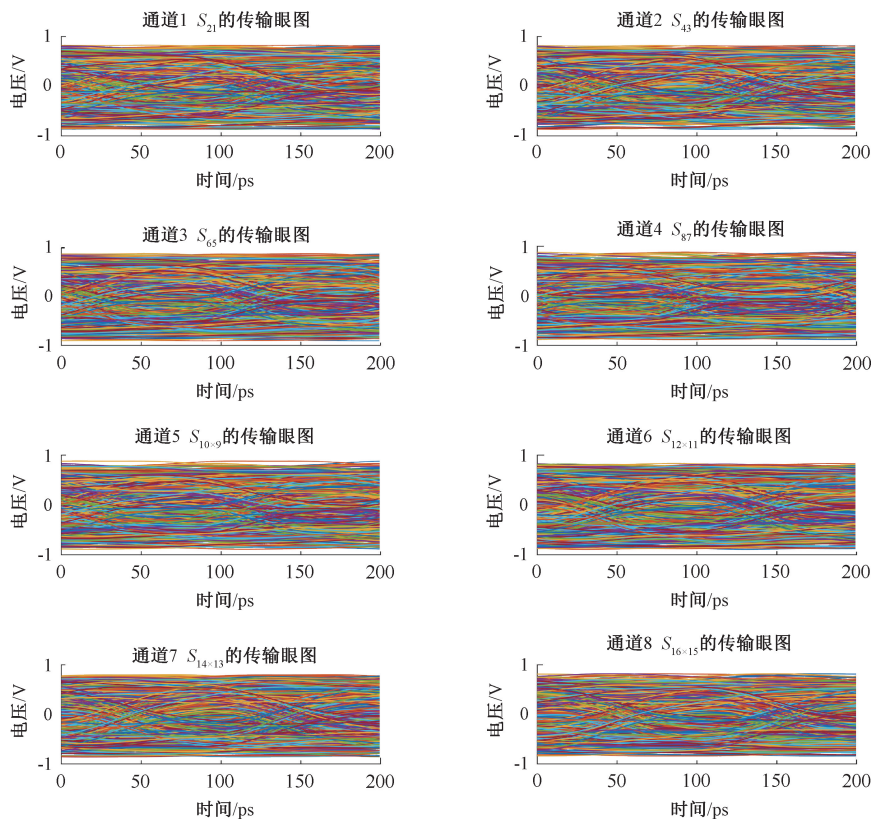


图 10 传输速率 10 Gb/s 时 HDMI 传输线正向传输眼图

Fig. 10 Forward transmission eye diagram of HDMI transmission line at a transmission rate of 10 Gb/s

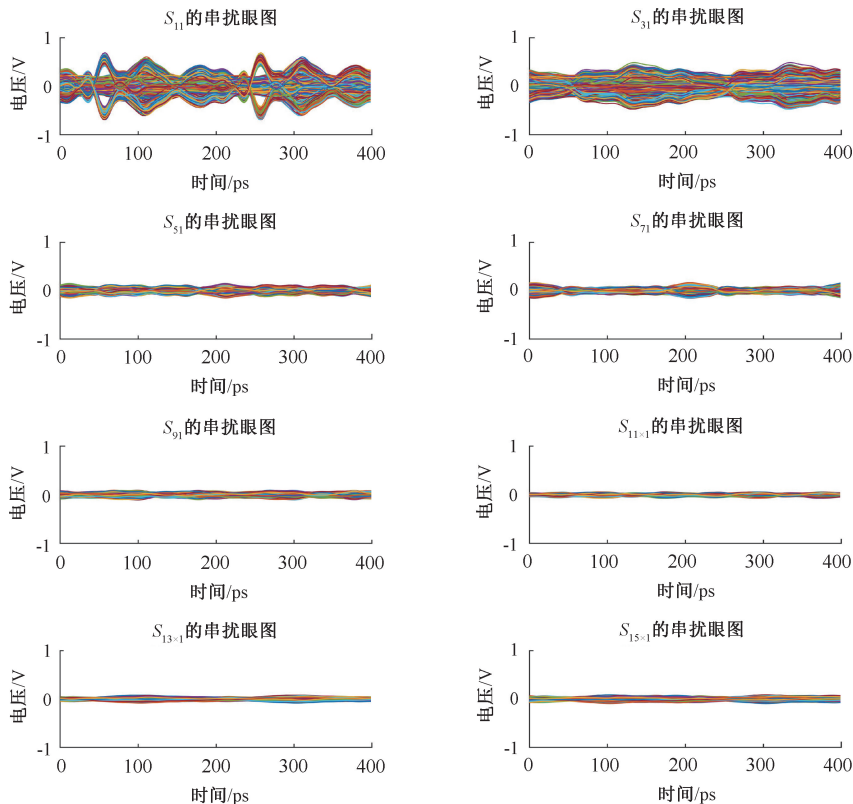


图 11 传输速率 5 Gb/s 时 HDMI 传输线近端串扰眼图

Fig. 11 Forward transmission eye diagram of HDMI transmission line at a transmission rate of 5 Gb/s

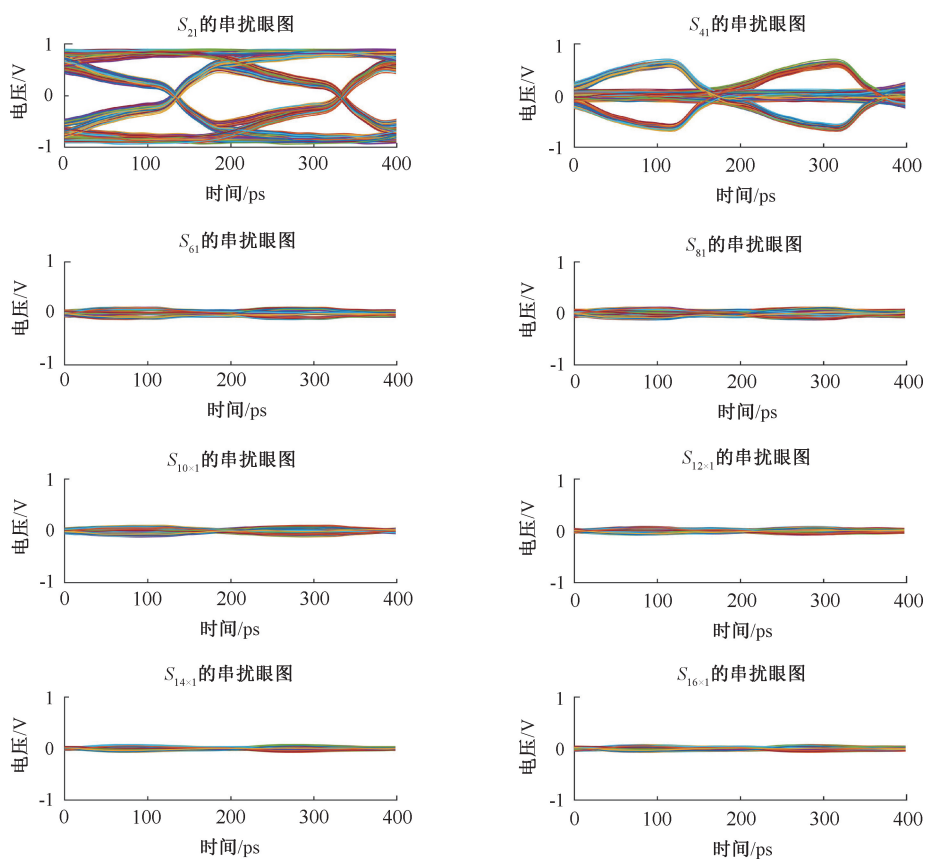


图 12 传输速率 5 Gb/s 时 HDMI 传输线远端串扰眼图

Fig. 12 Far end crosstalk eye diagram of HDMI transmission line at a transmission rate of 5 Gb/s

3 结 论

本文以多通道高速数据传输线为应用场景,介绍了数据传输线频域与时域测量表征方法,把多通道数据传输线等效为多端口微波网络,利用多端口矢量网络分析仪来测量多端口网络 S 参数,就可以获得多通道数据传输线的频域反射 S 参数和频域传输 S 参数,实现对多通道数据传输线的频域表征与建模。通过对频域反射 S 参数和传输 S 参数进行傅里叶反变换,可以获得多通道数据传输线的时域反射和传输的冲激响应,假设把一个理想无码的数字信号输入到一个非理想的多通道数据传输线,通过输入数字信号与冲激响应的卷积,可以获得多通道数据传输线的输出数字信号,把输出数字信号用眼图形式表达出来,就可以获得数字电路工程师熟悉的眼图,实现对多通道数据传输线的时域建模。本文以 HDMI 数据传输线为实验验证对象,制作了 HDMI 数据传输线的测试夹具,利用多端口微波矢量网络分析仪获得了 HDMI 数据传输线频域 S 参数和时域冲激响应,能够反映数据传输线频域和时域的反射、传输和串扰特性,验证了多通道数据传输线测量表征方法的有效性。本文采

用多端口矢量网络分析仪的频域测量表征方法与传统的采用数字存储示波器或取样示波器的时域测量表征方法相比,具有测量速度快,无需一根一根的测量,一次连接即可同时获得多根传输线的反射、传输和串扰频域 S 参数和时域眼图,解决了多通道高速数字传输线时域眼图同时测量的难题,为数字电路工程师提供了先进测试手段。

参考文献

- [1] 王莹,王燕,曹子剑. 高速数字信号测试完整性分析与研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (4): 45-49.
WANG Y, WANG Y, CAO Z J. Analysis and research on integrity of high speed digital signal testing [J]. Computer Measurement and Control, 2022, 30 (4): 45-49.
- [2] 钱志良. 高速背板连接器信号完整性研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4 (1): 57-58, 68.
QIAN ZH L. Research on signal integrity of high-speed backplane connectors [J]. Electronic Components and Information Technology, 2020, 4 (1): 57-58, 68.

- [3] 彭理. 基于高速背板无源链路的信号完整性研究与设计[D]. 北京:北京工业大学, 2021.
PENG L. Research and design of signal integrity based on high speed backplane passive link [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [4] 谢锐, 裴东兴, 姚琴琴. 高频信号动态测试中的信号完整性分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (3): 773-779.
XIE R, PEI D X, YAO Q Q. Signal integrity analysis in dynamic testing of high-frequency signals [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 773-779.
- [5] 陈世强, 刘明, 姚三坤, 等. 高速 PCB 传输线信号完整性设计要点研究[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2024, 33(3): 368-376.
CHEN SH Q, LIU M, YAO S K, et al. Research on the key points of signal integrity design for high speed PCB transmission lines [J]. Journal of Yunnan University for Nationalities (Natural Science Edition), 2024, 33 (3): 368-376.
- [6] 李洋. 高速信号完整性优化在 5G 通信设备设计中的应用[J]. 数字通信世界, 2024(12): 151-153.
LI Y. Application of high speed signal integrity optimization in 5G communication equipment design [J]. Digital Communication World, 2024 (12): 151-153.
- [7] 李秀娟, 刘永信, 黄平平, 等. 矢量网络分析仪极化特征参数测量校准方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36 (10): 26-32.
LI X J, LIU Y X, HUANG P P, et al. Research on the measurement and calibration method of polarization characteristic parameters for vector network analyzer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (10): 26-32.
- [8] 沈嘉诚, 裴国华, 袁勤文. 基于云的矢量网络分析仪在线系统软件设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38 (8): 245-253.
SHEN J CH, QIU G H, YUAN Q W. Software design of cloud based vector network analyzer online system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (8): 245-253.
- [9] KARIME A, BATTISTEL A, MÖLLER K. Vector network analyzer (VNA) measurements for electrical impedance tomography [J]. Current Directions in Biomedical Engineering, 2024, 10(4): 360-364.
- [10] 刘长海, 徐宙, 姜浩楠, 等. 基于矢量网络分析仪的多通道测试系统的设计与实现[J]. 计量与测试技术, 2024, 51 (6): 57-60.
LIU CH H, XU ZH, JIANG H N, et al. Design and implementation of multi channel testing system based on vector network analyzer [J]. Metrology and Testing Technology, 2024, 51 (6): 57-60.
- [11] 徐宙, 刘连照, 刘长海, 等. 基于单端口误差的多通道测试方法研究[J]. 计量与测试技术, 2024, 51 (10): 85-88.
XU ZH, LIU L ZH, LIU CH H, et al. Research on multi channel testing method based on single port error [J]. Metrology and Testing Technology, 2024, 51 (10): 85-88.
- [12] 梁冰, 田合丰, 郭超, 等. 多通道模拟开关的 S 参数测试分析[J]. 集成电路应用, 2023, 40 (5): 4-5.
LIANG B, TIAN H F, GUO CH, et al. Analysis of S-parameter testing for multi-channel analog switches [J]. Integrated Circuit Applications, 2023, 40 (5): 4-5.
- [13] BIAN Y, ZHAO C. Enhancing our vision of aerosols: Progress in scattering phase function measurements[J]. Current Pollution Reports, 2024, 10(1): 87-104.
- [14] 黄斌科. 一段均匀传输线散射参量计算的四种方法[J]. 电气电子教学学报, 2025(1): 111-114.
HUANG B K. Four methods for calculating scattering parameters of a uniform transmission line [J]. Journal of Electrical and Electronic Education, 2025(1): 111-114.
- [15] CHRISTOPHER D, WHITHAM R, BRIAN H, et al. Scattering parameter measurements of the long wavelength array antenna and front end electronics [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2023, 135(1046): 16.
- [16] 韦科宇. 基于矢量网络分析仪的眼图测量及参数提取方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017.
WEI K Y. Research on eye diagram measurement and parameter extraction method based on vector network analyzer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [17] 陈星燎, 高恩辉, 刘通. 一种测量误码率谱构建眼图的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38 (3): 219-229.
CHEN X L, GAO EN H, LIU T. A method for constructing eye diagrams by measuring bit error rate spectra [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 219-229.
- [18] 杨诒斌, 王俊强, 柴世豪, 等. 基于取样示波器的波形和眼图生成[J]. 电子设计工程, 2024, 32 (12): 6-9, 16.
YANG Y B, WANG J Q, CHAI SH H, et al. Waveform and eye diagram generation based on sampling

oscilloscope [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32 (12): 6-9,16.

[19] KANG W J, CHEN Y C, KAO H W. Eye diagram measurement device and eye diagram measurement method[P]. US16408486,2019.

[20] PAN C, LIU F, CHEN B. Design and implementation of eye diagram test equipment based on OMAP-FPGA[J]. ICIC Express Letters,2014,8(11):3151-3156.

[21] PARK J, PARK H. System-level statistical eye diagram for signal integrity [J]. Electronics, 2024, 13 (22): 4387-4387.

作者简介



刘明金 (通信作者), 2022 年于西安科技大学获得学士学位, 现为中北大学硕士研究生, 主要研究方向为微波射频电路设计与测量。
E-mail: mingliu@163.com

Liu Mingjin (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Xi'an University of Science and

Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in North University of China. His main research interest includes microwave RF circuit design and measurement.

 **年夫顺**, 分别在 1983 年和 1989 年于西安交通大学获得学士学位和硕士学位, 现为中北大学电子测试技术国家重点实验室学术委员会副主任, 中国电子科技集团公司测试仪器首席科学家, 主要研究方向为微波毫米波测量技术及仪器、太赫兹测试技术研究

和矢量网络分析技术。
E-mail: nfwxmnk@825@163.com

Nian Fushun received his B.Sc. degree and M.Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1983 and 1989, respectively. Now he is the deputy director of the Academic Committee of the State Key Laboratory of Electronic Testing Technology of North University of China and the chief scientist of testing instruments of China Electronics Technology Group Corporation. His main research interests include microwave and millimeter wave measurement technology and instruments, terahertz testing technology research and vector network analysis technology.